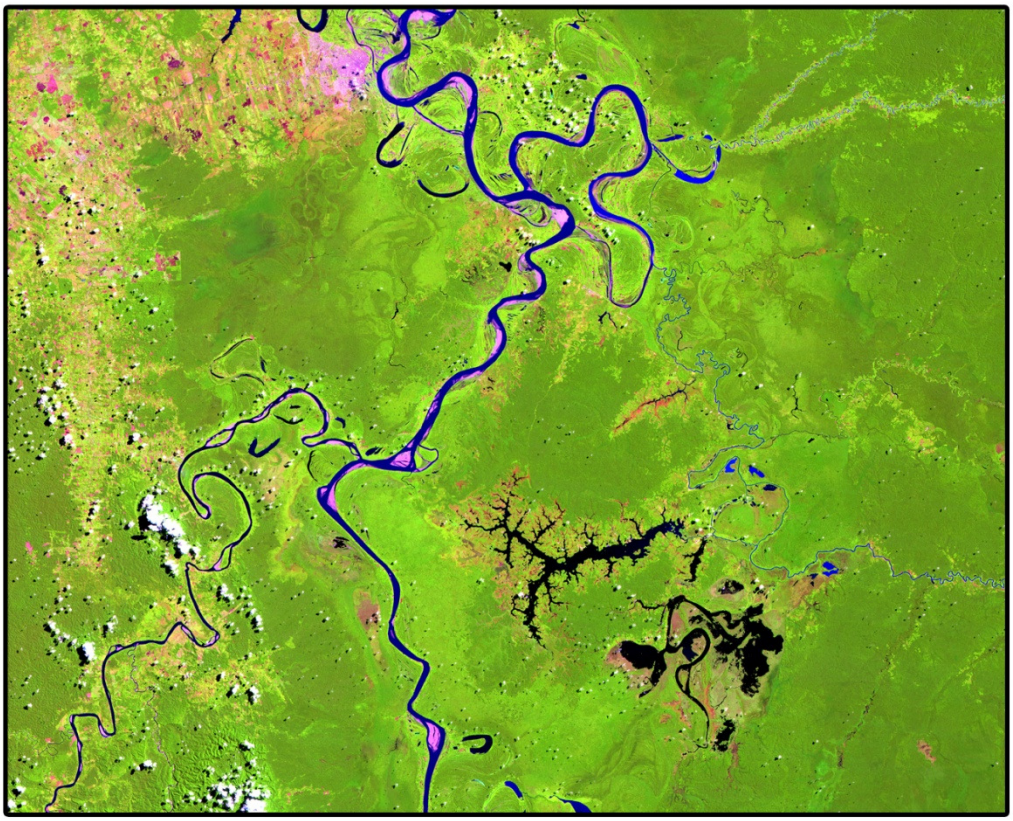
Rapport de stage de Mater 1:

La dynamique des méandres du rio Ucayali



Jérôme Leroux

Encadrant de stage au Pérou: Alain Crave
Correspondant universiataire : Stéphane Bonnet
Effectué au laboratoire d'observation HyBAm (IRD Pérou)
Rapport de stage de Master 1 H3 - Université de Rennes 1
Rendu le 15.06.09
Année universitaire 2008-2009

Résumé :

La dynamique des méandres est un vaste sujet d'étude où les recherches se font aussi bien du point de vue naturaliste que du point de vue numérique. Cette étude tend à mettre en évidence les déplacements des rios méandrés du bassin Amazonien, et de corréler leurs déplacements avec les paramètres de contrôle qui vont influencer la migration d'une rivière à méandre. Pour mettre en place la méthode de travail, le rio Ucayali a été étudié car il présente de très forte migration de méandre le long de son cours, notamment près de la ville de Pucallpa (Pérou).

Etant gratuites et à de fortes fréquences de prises de vue, les images satellites MODIS ont été retenue pour cette étude, malgré leurs résolutions assez faibles de 250 mètres et la présence constante de nuages sur les images satellites. L'utilisation du logiciel *eCognition*™ à permis de mettre en place une méthode d'extraction rapide de l'objet « rivière » et d'en calculer toutes les caractéristiques géographiques très facilement, permettant un traitement des données plus conséquent.

Parmi les nombreuses méthodes présentent dans la littérature pour caractériser et quantifier la migration d'un méandre, la délimitation des zones d'érosion et de déposition a été retenue. De plus, une méthode consistant à suivre les points d'inflexion et d'apex de chaque méandre a été mise en place. Ceci afin de qualifier et de quantifier la migration des méandres sur la zone d'étude du rio Ucayali.

Les premiers résultats montrent des zones de fortes migrations, et une tendance générale en absolue des points caractéristiques des méandres vers le Nord-Ouest. La zone de forte migration situé près de Pucallpa peu être expliqué par la présence d'un méandre abandonné et d'un affluent à l'amont. Ces deux phénomènes ayant pour effet d'augmenter le débit de la rivière et ainsi les vitesses d'érosion et de déposition. La corrélation entre le déplacement des apex des méandres et la sinuosité confirmant cette hypothèse. Toutefois, la corrélation entre la vitesse de migration des méandres et d'autres paramètres de contrôle devra être faite lors du second temps du stage.

L'utilisation d'autres images satellites sera aussi la prochaine étape de cette étude pour confirmer l'utilisation des images MODIS dans la quantification des déplacements des méandres du rio Ucayali. Ceci afin de validé l'exploitation des images MODIS pour d'autres rios situés dans le bassin Amazonien.

* *<u>Images sur la page de présentation</u> : Image LANDSAT de l'Ucayali près de la zone de Pucallpa*

SOMMAIRE :

Introduction

1. Revues bibliographiques à propos de l'étude
   - 1.1. Les rivières méandriformes
   - 1.2. Evaluation de la migration des méandres
   - 1.3. Paramètres de contrôle de la migration des méandres
     - 1.3.1. Géométrie des méandres
     - 1.3.2. Paramètre de contraintes et de résistances

2. Object d'étude, l'Ucayali
   - 2.1. Caractéristiques
   - 2.2. Première mise en évidence de migrations

3. Données et Méthodes
   - 3.1. Images satellites MODIS
   - 3.2. Le logiciel *eCognition*™
     - 3.2.1. Principe du logiciel
     - 3.2.2. Application sur les images MODIS
   - 3.3. Méthode d'interprétation des paramètres des méandres

4. Résultats au 15.06.09
   - 4.1. Mise en évidence de la migration
   - 4.2. Comparaisons avec les paramètres géométriques

5. Discussion
   - 5.1. Mise en évidence de la migration
   - 5.2. Comparaisons avec les paramètres géométriques

6. Limites et Perspectives

Conclusion

Bibliographie

Introduction

Les rivières méandriformes sont les objets hydrologiques les plus sujets au dynamisme de part leurs morphologies. Outre son implication dans le domaine de la recherche, l'analyse du dynamisme des rivières à méandres a pour but d'élaborer une banque de données permettant la prédiction des déplacements des rivières aux abords de zones habités (Rapp et Abbe, 2003). Toutefois la compréhension de l'organisation d'une rivière reste à faire, car on ne sait toujours pas pourquoi une rivière va développer une sinuosité très importante et allonger sa longueur pour parcourir une faible distance. La compréhension de la dynamique des méandres fait donc l'objet de recherche aussi bien du point de vue analytique (Hooke, 2006) que du point de vue numérique (Lancaster et Bras, 2002 ; Seminara, 2006) avec l'élaboration de modèle numérique. Ces deux approches ont pour même objet une rivière développant une géomorphologie particulière faite de courbes sinueuse où les processus d'érosion et de déposition sont très hétérogènes. Ces différents processus induisant un dynamisme, plus ou moins fort selon le contexte local. En effet, localement, certains paramètres vont influencer la vitesse de migration des méandres. Ils sont observés et suivis pour les objets naturels, ou servent de variables dans les modèles numériques.

L'approche développée pour ce stage consiste à mesurer la migration des rivières à méandres ainsi qu'à mesurer d'autres paramètres intrinsèques à la partie de la rivière mesuré. Ces deux mesures permettront d'observer des corrélations entre les vitesses de migrations et les paramètres qui vont jouer sur cette migration.
L'observatoire de recherche en environnement HyBAm (IRD) a pour objectif la compréhension du contrôle géodynamique, hydrologique et biogéochimique de l'érosion/altération et des transferts de matière dans le bassin de l'Amazone. Des données d'imagerie satellites sont disponibles librement dans la base de données de l'observation. Le bassin Amazonien offre une population importante de rivières à méandres ce qui permet d'avoir une large gamme d'étude pour la compréhension des migrations des méandres, et ceci à différentes échelles d'espace et de temps grâce à l'utilisation d'images satellites.
Ce large panel de rivière dans le bassin Amazonien permettant deux choses :

- Mettre en évidence et quantifier la migration de chaque rivière à méandre.
- Corréler les vitesses de migrations avec des paramètres de contrôles de la migration et ceci à plusieurs échelles d'espaces et de temps.

Afin de mettre en place la méthode de travail sur tous les rios du bassin Amazonien, une seule rivière a été étudiée pour ce premier temps de stage : Le rio Ucayali. Cette rivière présente de très fort déplacement, et les vitesses de migration y sont mesurables à l'échelle annuelle. Ceci a été mis en évidence grâce à des études précédentes utilisant les images satellites comme support de travail.
L'analyse d'images satellites est le moyen le plus facile et efficace pour mesurer la migration d'un méandre (Rapp et Abbe, 2003). A l'aide du logiciel *eCognition™*, une approche différente d'extraction d'objet à été mise en place sur des images Satellites MODIS. L'exportation sur *Arcgis™* permettant de visualiser plus facilement et rapidement les migrations et les paramètres géométriques. Les caractéristiques de la rivière à méandres sont calculées et des corrélations peuvent être faites entre les données.

1. Revues bibliographiques à propos de l'étude

1.1. Les rivières méandriformes

On caractérise généralement une rivière méandriforme méandre par sa sinuosité. La sinuosité est le rapport entre la longueur de rivière (L) et la longueur la plus courte entre les 2 points choisies sur la rivière (λ pour la Fig. 5). Une rivière est considérée comme méandriforme pour une sinuosité de plus de 1,5 (Brice, 1974).
La variabilité de la sinuosité de la rivière est due aux processus d'érosion qui y jouent. Deux processus antagonistes vont faire évoluer la sinuosité de la rivière. Les parties extérieures concaves seront érodées alors que les berges intérieures convexes seront en sédimentation (Fig. 1). Comme la largeur d'une rivière ne s'étend pas à l'infinie, le chenal de la rivière va donc migrer vers les berges érodées, augmentant la sinuosité de la rivière. Il arrive un moment où les migrations des berges entrainent la déviation du cours d'eau, créant des parties de méandres abandonnées (bras mort ou *oxbow lakes*), ceci diminuant la sinuosité.

Parmi les 4 formes de rivière à chenal que sont les rivières en tresse, les rivières à méandres, les rivières droites et les rivières anastomosés, la rivière à méandres serait la rivière ayant un seul chenal principale la plus sujet au dynamisme latéral. On distingue les rivières à méandres encaissés ou de vallée, des rivières à méandres libres ou de plaines alluviales qui sont sujet à un fort dynamisme de par le matériel érodé qui est constitué de sédiments très récents.

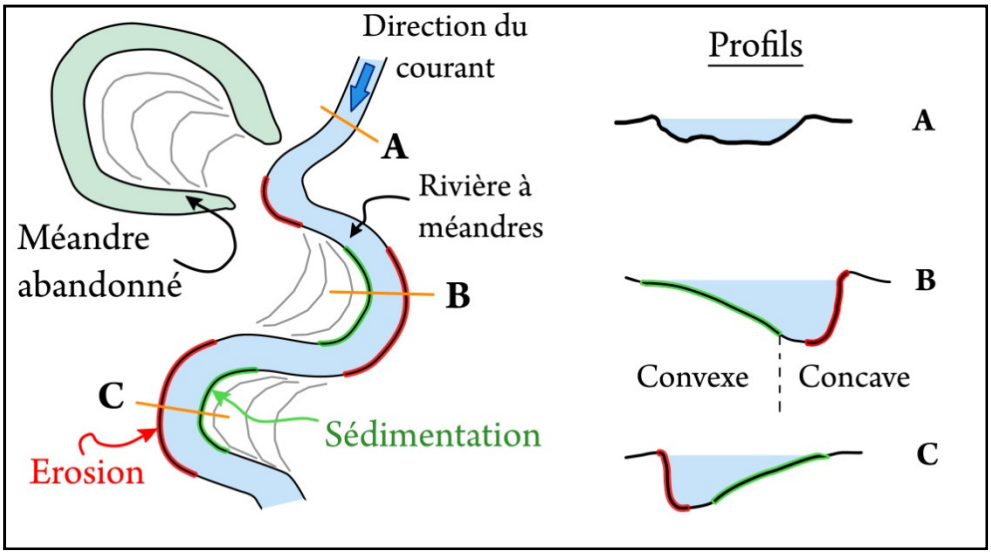


Fig. 1 : Processus au sein des méandres et profils en travers

1.2. Evaluation de la migration des méandres :

Il existe différentes manières d'évaluer la migration des méandres, qui dépendent de ce qu'on veut mesurer.
Rapp et Abbe proposent deux méthodes de mesurer la migration des méandres. Par la méthode des « transects » dans un premier temps (O'connor et al., 2003 ; Rapp et Abbe, 2003), où le travail consiste à suivre les changements de position de la ligne centrale du chenal principal avec une perpendiculaire tracée entre les deux côtés de la plaine alluviale (Fig. 2). La méthode ne nécessite pas l'utilisation d'un SIG car il n'y a pas de calcul complexe à faire sur la photographie.

Une autre approche consiste à tracer les deux bords du chenal principal et de superposer les différents tracés afin de calculer des surfaces (O'connor et al., 2003 ; Hooke, 2006). Les surfaces qui se superposent n'enregistrent aucun changement, alors que les surfaces non superposables pourront être considérées comme des surfaces d'érosion ou de déposition de sédiments en fonction de la direction de migration du méandre (Fig. 3).

La surface d'érosion créé par la migration pourra être normalisée par rapport au périmètre formé par les deux berges érodés à deux temps différents, afin d'estimer une distance de migration moyenne sur le méandre étudié (Constantine, 2008).

Enfin une dernière méthode consiste à définir le vecteur représentant la migration du chenal entre deux temps différents (Lagasse). Ce vecteur pourra renseigner sur l'amplitude de la migration et la typologie de déplacement du méandre comme montré dans la Fig. 4.

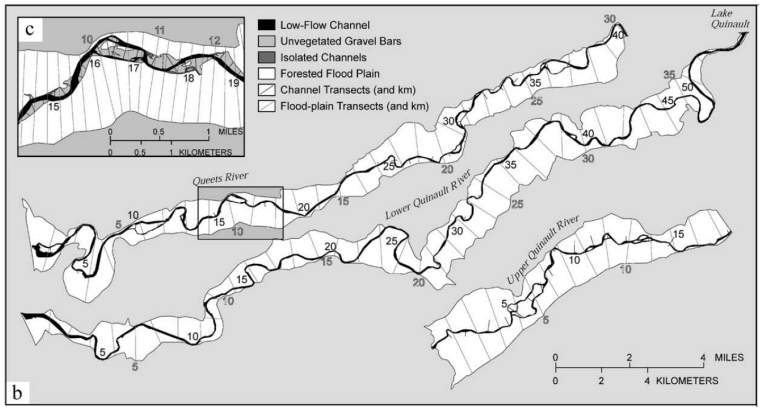


Fig. 2: La méthode des transects sur la Rivière Quinault, Washington, USA (O'Connor et al., 2003)

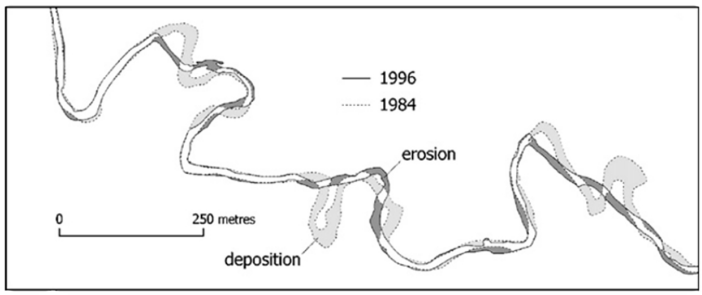


Fig. 3 : Méthodes des polygones sur la rivière Dabe, NW Angleterre (Hooke, 2006)

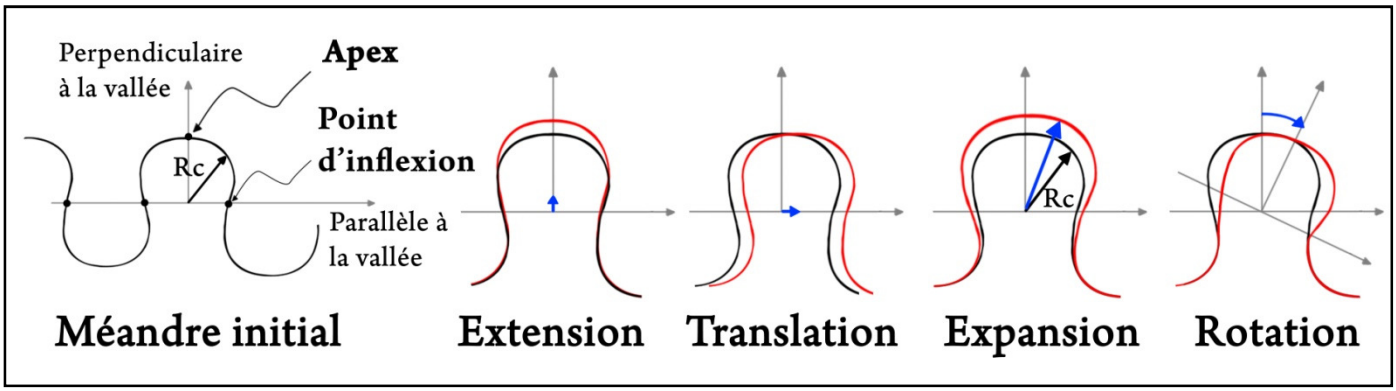


Fig. 4 : Modes de migrations des méandres

1.3. Paramètres de contrôle de la migration des méandres

Les paramètres pouvant contrôler la migration des méandres peuvent être distingué en 3 groupes :

-Les variables géométriques du chenal de la rivière, qui vont évoluer avec les migrations, mais aussi avoir un contrôle sur la migration.

-Les paramètres de contraintes sur la migration des méandres (hydraulique, pente).

-Les paramètres de résistances (résistances des berges, géologie, granulométrie des sédiments érodés ou déposés).

Ces paramètres seront développés dans la suite de cette partie.

1.3.1. Géométrie des méandres :

Hormis les vitesses de migrations, la géométrie des méandres peut être facilement mesurée à partir des images satellites ou photos aériennes. Ainsi, on pourra calculer la sinuosité, la longueur d'onde, le rayon de courbure, la largeur du chenal et les coordonnées spatiales des points caractéristiques du méandre : les points d'inflexion et les apex (Fig. 5).

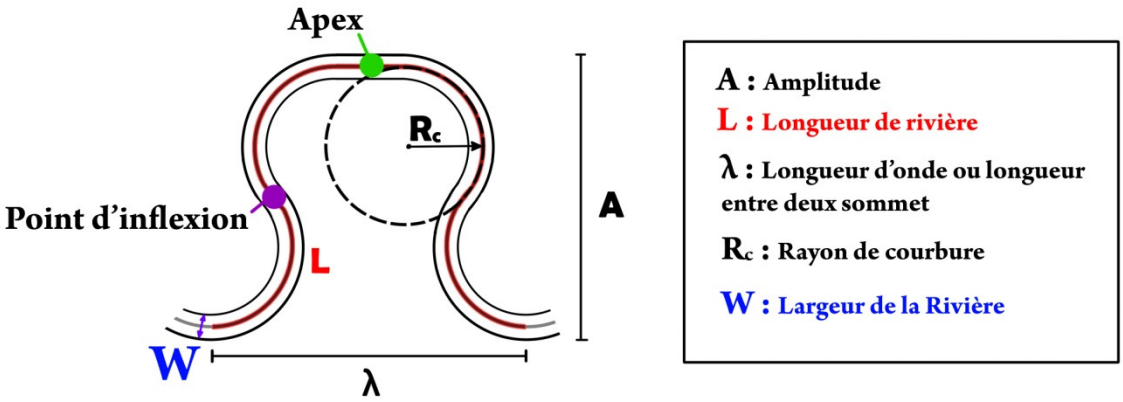


Fig. 5: Paramètres géométrique d'une rivière à méandres.

Ces variables pourraient avoir une influence sur la vitesse de migration des méandres d'après les auteurs. Parmi les différentes observations, deux sont à retenir :
Le rapport entre le rayon de courbure et la largeur du chenal aurait un impact sur la vitesse de migration. La valeur maximum de migration éteint atteinte pour un rapport égal à 3 (Hickin et Nanson, 1975), et pour des valeurs inférieures ou supérieures, la vitesse de migration diminue. D'autres auteurs mettent en avant une sinuosité critique de 3,14 à laquelle la rivière méandrée ne pourra plus migrer (Hooke, 2007).

1.3.2. Paramètre de contraintes et de résistances :

Contraintes :

La pente et le débit sont les deux principaux paramètres qui vont influencer la dynamique d'une rivière et la migration d'un méandre. En effet la pente de la rivière influence le taux de migration des méandres, car à un débit constant, la vitesse de migration augmente lorsque la pente augmente (Nanson et Hickin, 1986). Leopold et Wolman (1960) ont établit une formule empirique reliant la pente(S) au débit de plein bord (Q) :

$$S = 0{,}06\ Q^{-0{,}44} \qquad (1)$$

Si la pente est inférieure à une valeur limite pour un débit donné alors la rivière sera à méandres. En outre, la migration des méandres atteindra son maximum lors des crues puisque la contrainte cisaillante et la puissance hydraulique y sont au plus fort (Hickin et Nanson, 1975).

Résistances :

Les paramètres antagonistes aux paramètres de pente et de débits, sont ce qui caractérise le matériel érodés et l'environnement dans lequel le méandre évolue. On retiendra que la nature de roches érodées et sa granulométrie influence l'érosion et donc la migration des berges. Les sables et les graviers, non cohésifs, sont plus sensibles à l'érosion que d'autres matériaux comme l'argile, alors que la granulométrie des berges aura un impact sur le coefficient de résistance à la migration (plus la granulométrie est forte, plus la résistance est grande) d'après Nanson et Hickin, 1986.

2. Objet d'étude : l'Ucayali.

2.1. Caractéristiques :

Avec une surface de bassin versant de plus de 6 million de km², le bassin Amazonien apporte 209 000 $m^3.s^{-1}$ en moyenne par an à l'océan Atlantique (Molinier et al. 1996). Ce bassin versant représente 76 % de la superficie du Pérou, où se trouve le bassin versant du Rio Ucayali. Le rio Amazonas au Pérou est issu de la jonction entre les rios Marañón et Ucayali. L'Ucayali est donc l'un des plus important contributaire de l'Amazone avec un débit moyen à l'année de 14 000 $m^3.s^{-1}$ avec un bassin versant de 360 500 km² (Espinoza et al, 2006).

Le Rio Ucayali prend sa source dans les Andes Péruviennes à 5597 mètres, totalisant une longueur de 2885 km d'altitude depuis la source d'Apurímac jusqu'à sa confluence avec le Marañón. Mais l'Ucayali prend sa véritable dénomination de la confluence entre les rios Tambo et Urubamba, jusqu'à sa confluence avec le rio Marañón. Sa longueur de cours d'eau appoximative est de 1600 km (Fig. 6).

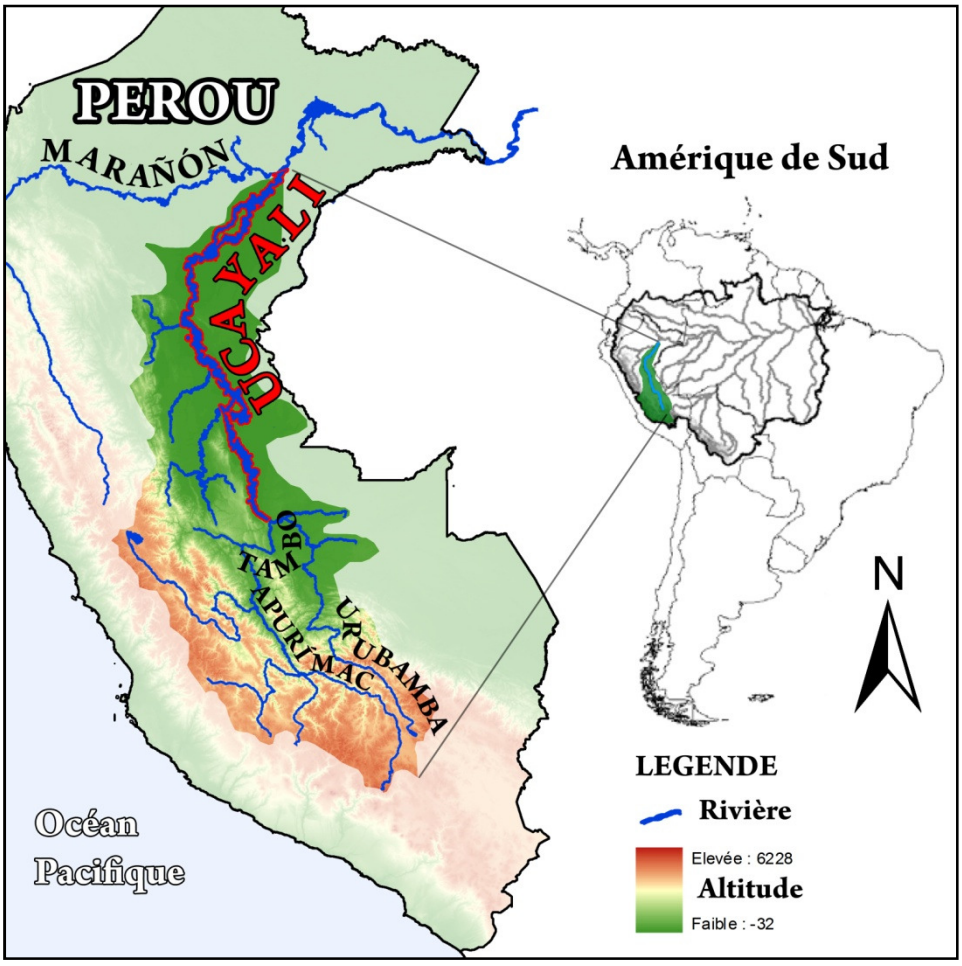


Fig. 6 : Topographie du Pérou et Rios Péruvien

2.2. Première mise en évidence de migrations

Pourquoi s'intéresser au rio Ucayali ? Car des études préliminaire au sein de l'observatoire HyBAm ont déjà mis en évidence sont déplacement à l'échelle de l'année (Daupras, F, 2006). Il a été calculé une sinuosité de rivière de 1,96, qui correspond bien à une rivière de type méandre.

De plus l'observation simple de ce rio grâce à l'outil *GoogleEarth™* montre des plaines alluviales très récemment érodées et déposées, et la présence de nombreux méandres coupés devenus des lacs où la dynamique de migration n'a plus lieu (Fig. 3).

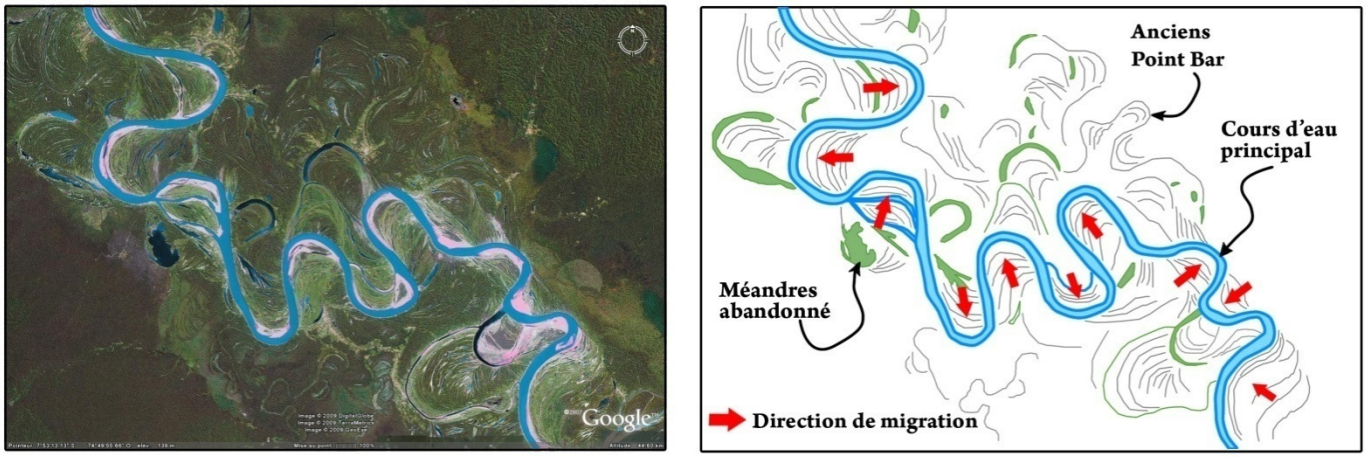


Fig. 7 : Plaine alluviale montrant la migration active de la rivière

Une autre image intéressante montre des différences dans la localisation du cours du rio à partir d'une seule image *GoogleEarth™* issu de la mosaïque de plusieurs images satellites prise à différentes périodes (Fig. 8). A gauche l'image *GoogleEarth™*, et à droite l'interprétation de l'image avec la mise en évidence des trois images satellites différentes dans leurs date de prise de vue.

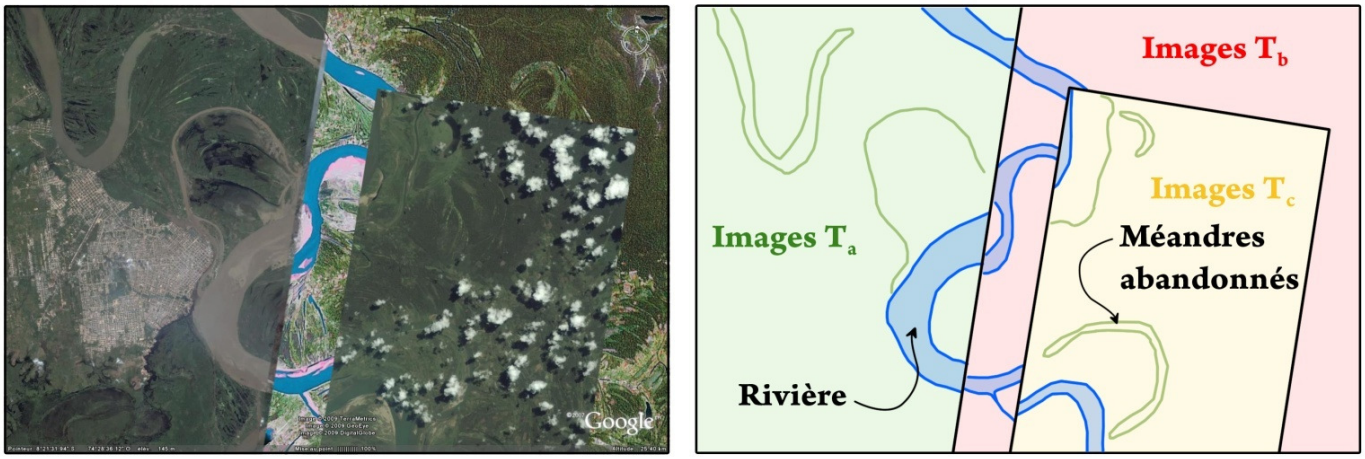


Fig. 8 : Différentes localisations de la rivière sur GoogleEarth™

Malgré que l'on puisse voir et qualifier la migration des méandres de l'Ucayali avec les images *GoogleEarth™*, il est difficile de la mesurer dans le cas de la fig. 8. Il est donc nécessaire d'utiliser d'autres données d'images satellites, prisent à des temps différents connus, ce qui nous permettra de calculer des vitesses de migration de méandre.

3. Données et Méthodes

3.1. Images satellites MODIS

Les images MODIS sont issues d'instrument embarqué sur deux satellites : les satellites Terra (EOS AM) et Aqua (EOS PM). MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroadiometer) est un instrument spectroradiométrique, installée à bord des deux satellites, qui permet d'obtenir des données et des images satellites. La surface de la Terre est survolée tous les 1 à 2 jours, MODIS enregistre des données d'une haute sensitivité radiométrique composé de 36 bandes spectrales allant de 0,4µm à 14,4µm (Infrarouge) avec une résolution maximum de 250m.

Avantages : L'atout principal des images MODIS est qu'elles sont gratuites, il est donc possible de construire une base de données sur plusieurs années et pour des zones géographiques étendues. Déjà géoréférencées, ces images ont été disponibles dans les bases de données Hybam.

Limites : Mais l'un des problèmes principaux inhérents aux images satellites est la présence permanente de nuages sur les images. Il faut donc recourir à la réalisation d'images composites issues de plusieurs jours d'images satellite. De plus avec une résolution de 250 m, un objet (par exemple une rivière) inférieure en largeur à cette résolution sera très difficile à distinguer sur une image.

3.2. Le logiciel *eCognition*™

3.2.1. Principe du logiciel

Afin d'être le plus efficace possible, le logiciel d'analyse d'image *eCognition*™ a été utilisé. Basé sur les deux outils de segmentation et de classification, la technologie *eCognition*™ repose sur le concept qu'une image ne réside pas seulement dans des pixels isolés mais dans des objets possédant une signification particulière ainsi que dans leurs relations.

Ainsi l'analyse d'une image passe par deux étapes :

- La segmentation : Cette étape permet de regrouper les pixels selon deux paramètres, la forme et la couleur. Il faut donc adapté la segmentation à la résolution de l'image et à l'information qu'on souhaite extraire.
- La classification : Cette étape permet de classifier les groupes de pixels, issus de la segmentation, par des critères qui seront propres aux objets que l'on souhaite extraire.

Une fois l'objet correctement distingué du reste de l'image, toutes les caractéristiques géométriques de l'objet peuvent être connues. Il est aussi possible d'exporter cet objet, ainsi que toutes ses caractéristiques, vers d'autres plateformes de SIG qui permettent une meilleure visualisation.

3.2.2. Application sur les images MODIS

Chaque bandes d'images satellite est composé de pixel ayant chacun une information. Plus la résolution est faible, plus l'information émis par un objet est en compétition avec les objets environnants lors de la construction des pixels qui définissent l'image. Les images disponibles dans la base de données Hybam sont des images composites issues de fragment d'images satellites sans

nuages sur 16 jours. Avec la faible résolution de l'image, le nombre d'objet créé a été équivalent au nombre de pixel lors de la segmentation, pour ne perdre aucune information par rapport à l'image.
A partir des 2 bandes des images MODIS, une bande dans le visible (R : 620 à 670 nm) correspondant au rouge et une seconde bande dans le proche infrarouge (NIR : 841 à 876 nm), la classification de la rivière à été faite à l'aide de l'indice de végétation par différence normalisé (NDVI) :

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (2)$$

La rivière Ucayali étant dans un environnement où la végétation est omniprésente, il est donc assez simple de classifier la rivière du reste de l'image qui est composé principalement de végétation. Avec la formule, les objets « végétation » aura un NDVI supérieur à zéro, et tout ce qui n'est pas de la végétation sera inférieur à 0. Les rivières ayant des valeurs très inférieures à 0.
D'autres outils de classification pourront être utilisés pour affiner la classification comme le rapport « Longueur/Largeur » de l'objet qui sera fort pour une rivière.

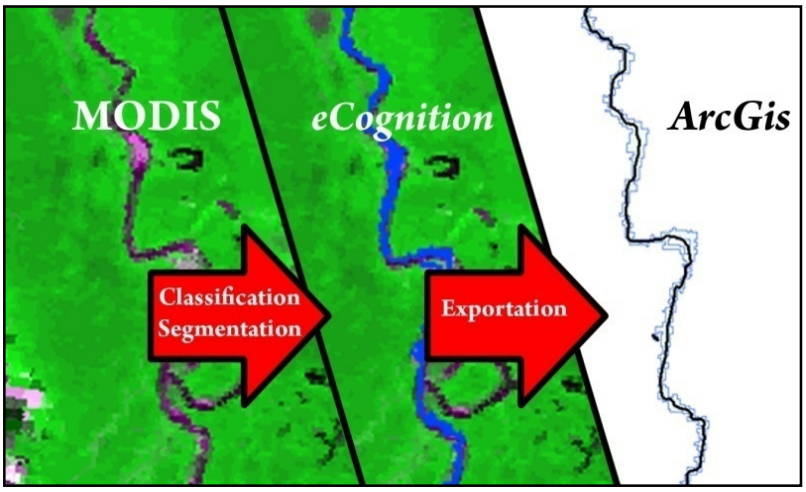


Fig. 9 : Chaine de traitement des images MODIS pour extraire l'objet « rivière »

L'extraction de l'objet « rivière » par *eCognition*™ étant faite, il a été exporté vers le logiciel *Arcgis*™ pour plus de commodité de manipulation et de visualisation (Fig. 9). Ainsi la ligne médiane entre les deux berges du chenal de la rivière, le polygone de la rivière on été extraite, et ceci est fait pour chaque images satellites. Et pour chaque objet, les caractéristiques géométriques ont été calculées : longueurs, largeurs, coordonnées dans l'espace…

3.3. Méthode d'interprétation des paramètres des méandres

L'analyse a été portée sur les années les plus éloigné dans le temps : 2000 et 2005, pour distinguer et mettre en évidence les déplacements les plus prononcés. Pour s'affranchir des problèmes liés à la différence de largeur du chenal de la rivière lors des périodes de crues et d'étiages, le même jour de prise de vue à été sélectionné pour les deux années d'étude. La période près du 1er Aout correspond à une période de basses eaux pour le rio Ucayali (Molinier et al., 1996).
Pour chaque année, les coordonnées des points d'inflexions et des apex de chaque partie des méandres de la rivière ont été calculées. Afin de mettre en évidence la migration du chenal, le déplacement en absolue de chaque points caractéristiques du chenal a été faite (Fig. 10). Les résultats ont été représentés par rapport à la longueur de la rivière, et le déplacement mise en évidence selon les directions Nord-Sud et Est-Ouest (Fig. 11).

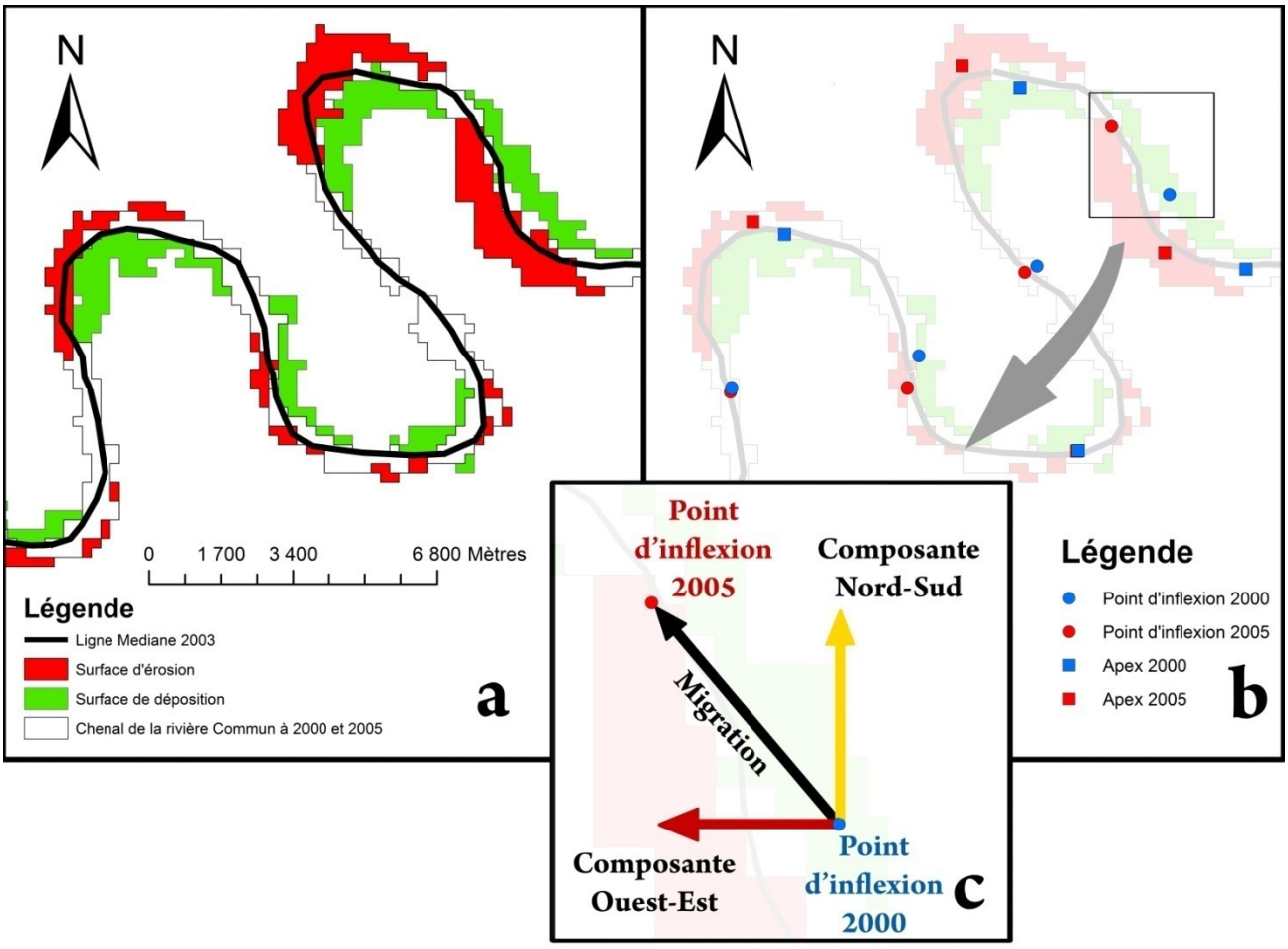


Figure 10 : Images ArcGis™ d'une partie de l'Ucayali et les données de migrations des méandres
a : Surface d'érosion et de déposition le long du tracé de la rivière ; b : Coordonnées de points d'inflexion et d'apex pour les deux années d'études ; c : Mise en évidence des composantes de déplacement d'un point d'inflexion.

Une autre méthode mise en œuvre est celle de O'connor et Hooke qui consiste à calculer les surfaces d'érosion et de déposition faite par la migration du chenal de la rivière entre deux années. Les années 2000 et 2005 ont donc été superposé, et à l'aide d'*eCognition™*, il a été possible de calculer toutes les surfaces d'érosion ou de déposition (Fig. 10). On remarquera sur la figure 11, les surfaces d'érosion et de déposition entre deux point d'inflexion ont été normalisé par rapport à la longueur de cours entres les points d'inflexions. Ceci afin de comparer les méandres entre eux, quelque soit leurs longueurs.
Enfin, le paramètre géométrique de la sinuosité a été calculé entre chaque point d'inflexion. Comme les longueurs de cours d'eau et les coordonnées des points d'inflexion sont différents de l'année 2000 à 2005, la longueur de la rivière de l'année 2003 à été retenue pour pouvoir calculer les demi-longueurs d'ondes entre chaque point d'inflexion. Les coordonnées médianes des points d'inflexion ont aussi été calculées. Cette méthode ayant été retenue compte tenu de la faible résolution de l'image.
En effet les images composites faites à partir de plusieurs images satellites étaient très inégale du point de vue de leurs qualités et surtout de leurs résolutions. On remarquera sur la figure 10, les surfaces d'érosion/déposition en forme d'escalier du fait de la résolution de l'image.

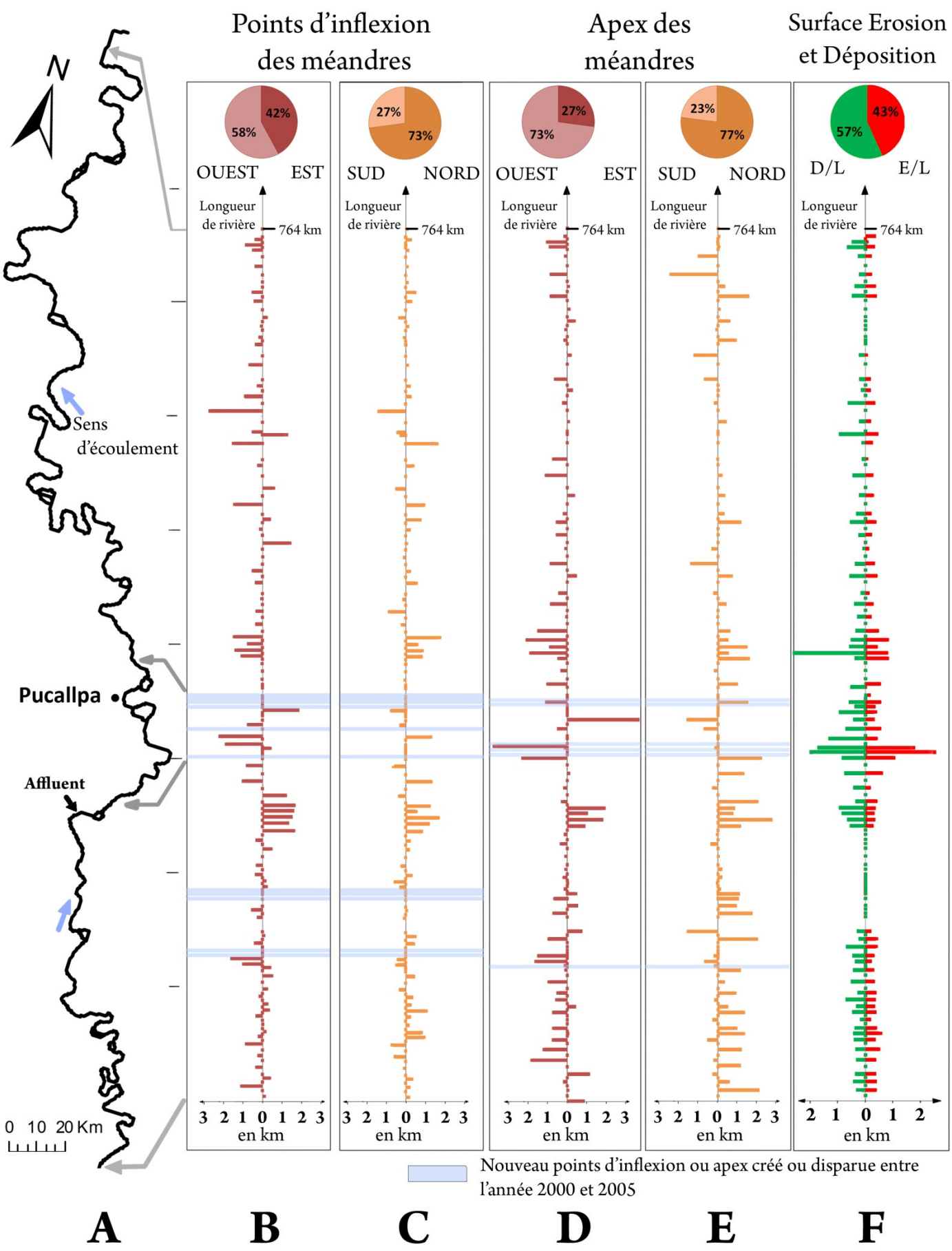


Figure 11 : Mise en évidence de la migration de la rivière Ucayali sur 5 ans

A : Tronçons d'étude de la rivière Ucayali ; B : Déplacements en km des points d'inflexion des méandres selon la composante Ouest-Est ; C : Déplacements en km des points d'inflexion des méandres selon la composante Nord-Sud ; D : Déplacements en km des points d'apex des méandres selon la composante Ouest-Est ; E : Déplacements en km des points d'apex des méandres selon la composante Nord-Sud ; F : Surfaces d'érosion et de déposition normalisé à la longueur du méandres. Les pourcentages situés dans les camemberts sont établies en sommant les déplacements vers les directions géographiques. Les 5 graphiques étant représentés par rapport à la longueur totale du tronçon étudié de la rivière Ucayali.

4. Résultats au 15.06.09

4.1. Mise en évidence de la migration

Les déplacements des points d'inflexion et des apex montrent une tendance vers le Nord-Ouest. Les pourcentages de déplacement ont été calculés en sommant les distances de déplacement. Ces pourcentages révèlent une tendance générale des points d'inflexion et des apex vers le Nord. La tendance vers l'Ouest est moins prononcée pour les points d'inflexion que pour les apex.

Tableau 1 : Résumé des données calculées sur la migration des méandres

Sinuosité sur la totalité du tronçon	2,04
Surface érodé (km^2)	182,830 ± 60,9
Surface déposé (km^2)	242, 097 ± 80,7
Vitesse de migration moyenne des apex ($m.an^{-1}$)	211 ± 70
Vitesse de migration moyenne des points d'inflexion ($m.an^{-1}$)	152 ± 51

Les surfaces d'érosion et de déposition, rapportées à la longueur de méandres, montrent une symétrie entre ces deux processus. Seule une surface de déposition n'est pas compensée par l'érosion sur l'autre berge. Il s'agit en faite d'un méandre coupé. Comme le tracé du cours d'eau en 2000 ne se superpose pas au tracé de 2005, la partie du méandre en 2000 est considéré comme une surface de déposition.
On peut comparer cette méthode à la méthode proposé par Constantine qui vise à rapporter la surface d'érosion ou de déposition au périmètre de cette surface. Ici la surface est rapportée à la longueur du méandre. Outre l'indication des forts taux d'érosion ou de déposition à un endroit de la rivière, ce rapport nous donne une estimation de la migration sur la longueur du méandre, puisque le rapport donne un résultat en mètre.

On voit donc à travers la figure 11 la corrélation entre les lieux de fortes migrations des méandres symbolisé par la migration des apex et les lieux de fortes surfaces d'érosion et de déposition. On remarque aussi la création ou la disparition d'apex ou de point d'inflexion, ce qui témoigne aussi d'un fort dynamisme car la rivière va tellement modifier son cours qu'elle va créer plus de sinuosité ou la réduire.
Le tableau 1 montre les données synthétiques des migrations des méandres sur la partie de l'Ucayali. Les incertitudes ont été calculés en assumant que chaque pixel de rivière a une incertitude de 33 %.

4.2. Comparaisons avec les paramètres géométriques

Même si l'étape est nécessaire, la question n'était pas à la base de mettre en évidence qualitativement et quantitativement les déplacements des méandres du rio Ucayali, mais de mettre en évidence les corrélations possibles entre la migration des méandres et des paramètres qui peuvent contrôler cette migration. Seuls les paramètres géométriques ont été disponibles pour ce premier temps d'étude.

La figure 12 met en relation les déplacements en absolue des apex de chaque méandres avec la sinuosité de ce méandre. La sinuosité du méandre étant calculée en faisant le rapport : longueur du méandre en cours d'eau entre deux points d'inflexion sur la longueur entre deux points d'inflexion à vol d'oiseau. Le but de cette relation étant de voir dans pour quelle sinuosité un méandre est le plus dynamique. La figure 12 montre des migrations plus importante d'apex pour de faible sinuosité et pour des fortes sinuosités, des migrations moins importantes.

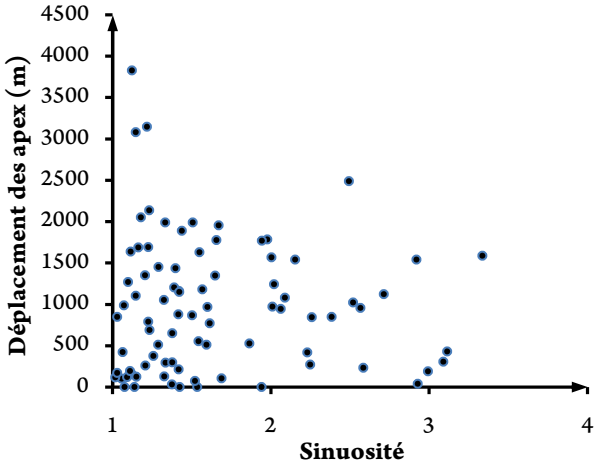


Fig. 12 : Graphique représentant le déplacement des apex en fonction de la sinuosité du méandre

5. Discussion

5.1. Mise en évidence de la migration

La tendance des méandres vers le Nord est tout à fait logique puisque un méandre va évoluer d'amont en aval lors de sa migration. En revanche la tendance vers l'Ouest n'est pas évidente. Plusieurs explications peuvent être avancées, mais le manque de donnée fait défaut pour ce premier temps d'étude. Il serait intéressant de regarder la pente régionale sur ce tronçon de l'Ucayali pour voir son effet sur la migration. De plus, la localisation moyenne de la rivière par rapport à la largeur de la plaine alluviale peut mettre en évidence la tendance vers l'Ouest. L'observation de l'Ucayali sur *GoogleEarth*™ et de sa zone de divagation montre bien une localisation à l'Ouest de la rivière dans la plaine alluviale, mais il serait intéressant de quantifier cette localisation.

Plusieurs zones de fortes migrations de méandres ressortent sur le tronçon d'étude de l'Ucayali.
La plus forte se trouve près de la ville de Pucallpa. Les taux d'érosion et de déposition, ainsi que les distances de migrations y sont les plus importantes. Malgré l'absence de données d'hydrologie, on peut émettre plusieurs explications à ce phénomène. Tout d'abord, la présence d'un affluent à l'Ucayali à l'amont de Pucallpa peut faire augmenter le débit, et ainsi augmenter la puissance hydraulique de la rivière, sans changer la pente du cours d'eau. De plus, la zone près de Pucallpa présente un méandre abandonné à l'amont. On sait que la rivière allonge sa longueur de rivière lors de la migration d'un méandre, diminuant la pente de la rivière et ainsi dissipe l'énergie hydraulique du cours d'eau. Lorsque la rivière trouve un autre chemin par raccourcissement, elle abandonne les méandres et ainsi augmente la pente de son cours d'eau, augmentant ainsi la puissance hydraulique de la rivière. Cela entraine de forte migration à l'aval de ce raccourcissement.

5.2. Comparaisons avec les paramètres géométriques

On peut émettre les mêmes hypothèses pour l'explication de la figure 12. Pour de forte sinuosité, la migration est plus faible que pour des faibles sinuosités. En augmentant sa sinuosité, la rivière va dissiper l'énergie en allongeant la longueur de la rivière et en diminuant la pente. La migration va donc diminuer en fonction de la diminution du débit de la rivière. L'indication en plus, est que pour de faible sinuosité, la vitesse de migration peut être très forte. Ce qui peut nous renseigner sur la rapidité d'une rivière à créer des méandres à partir du moment où l'élément déclencheur du phénomène de méandrisation va transformer la morphologie de la rivière.

6. Limites et Perspectives

La mise en évidence qualitative de la migration des méandres est exploitable avec les données d'images satellites MODIS, mais on peut tout à fait mettre en cause l'aspect quantitatif de la migration des méandres. En effet, la résolution des images est de 250 mètres par pixel, ce qui fait au minimum 125 m d'incertitude pour les pixels situés sur les berges de la rivière. Il serait donc très intéressant de passer à une résolution plus fine qui permettrait de quantifier les surfaces d'érosion/déposition et les migrations des points caractéristiques des méandres avec des incertitudes plus faibles. Ceci pour être plus sûr de la véracité de nos résultats et pour approuver l'utilisation des images MODIS. Parmi les données satellitaires disponibles, les images LANDSAT permettent d'avoir une résolution plus fine, de 30 mètres. Même si la période de prise de vue n'est pas assez fréquente, l'utilisation de ces images permettrait de quantifier la migration des méandres pour les mêmes périodes de prise de vue des images MODIS et de comparer les résultats.

Les paramètres suivant peuvent avoir un impact certain sur la migration des méandres d'après la bibliographie, tels que la végétation, la puissance hydraulique, la contrainte cisaillante, la turbulence, la rugosité des bancs, la topographie du lit, la hauteur des berges et les aménagements anthropique. Mais il est impossible de faire une étude incluant toutes ses variables. Il faut donc prendre en compte les paramètres les plus faciles à exploiter. Par exemple, d'autres paramètres géométriques seraient intéressants de calculer pour cette étude, notamment le rapport du rayon de courbure sur la largeur de la rivière. Le taux de migration serait en effet plus important pour certaines valeurs de ce rapport (Hickin et Nanson, 1975). Bien évidement, ce rapport est seulement calculable à partir d'images où la résolution permet de calculer une largeur de rivière assez précise avec peu d'incertitude. Les images MODIS ne le permettent pas.

Les déplacements des points caractéristiques des méandres ont été représentés en absolue par rapport aux coordonnées géographiques en admettant que la pente générale du cours d'eau avait cette direction. Il sera donc intéressant de pouvoir calculer la pente générale de la plaine alluviale pour pouvoir observer les déplacements relatifs par rapport à ce nouveau référentiel établit par la direction de plus grandes pente. De plus, le calcul de la pente du lit de la rivière à partir d'un MNT pourra nous donner d'autres données pour expliquer les zones de plus fortes migrations par la présence de rupture de pente. De plus, le calcul de la zone de plaine alluviale par MNT pourra être déterminé plus précisément que l'estimation de la zone de divagation du méandre par simple observation des images satellites.

La principale méthode dans cette étude est de voir le déplacement des points d'inflexion et d'apex. Ce suivie peut se faire sur une seule image où les cicatrices d'érosion et de déposition sont encore présentes près des méandres. Ceci afin de quantifier des déplacements sans la donnée du temps qui nous permet d'avoir accès aux vitesses de déplacements.

Enfin, le facteur d'échelle est peut être un élément important dans l'observation et l'analyse de la dynamique des méandres. Il faudra donc voir si ce facteur va influer sur les corrélations entres les paramètres de contrôle et les paramètres de migration. Ceci sur la rivière Ucayali pour des échelles plus grandes, mais aussi à des échelles inferieures, avec l'analyse de plus petit rio présent dans le bassin Amazonien.

Conclusion

Parmi toutes les méthodes d'analyse de la dynamique des méandres, l'étude s'est portée sur l'estimation de la migration des points caractéristiques des méandres : les points d'inflexion et des apex. De plus les calculs de surface d'érosion et de déposition ont été faits pour chaque méandre entre deux points d'inflexion. Ces données ont confirmées le fort dynamisme du rio Ucayali. Des zones de plus fortes migrations de méandre sont observées près de la ville de Pucallpa. Les premières explications avancées ne sont faite qu'à partir de l'observation de la géomorphologie de la rivière à l'amont de cette région. En effet la présence d'un méandre abandonné et d'un affluent à l'amont vont faire augmenter l'hydrologie du cours d'eau à l'aval, entrainant des contraintes plus importantes sur les berges et donc des migrations importantes. Ces hypothèses devront être vérifiées par les données de débits et de pente.
La première corrélation de la migration des méandres avec le paramètre géométrique de la sinuosité est prometteuse mais devra être appuyé par d'autres données de corrélation.
L'utilisation du logiciel *eCognition*™ permet de traiter de nombreuses données d'imagerie satellites. Toutefois, l'étude repose sur l'utilisation des images MODIS. Malgré la mise en évidence qualitative des déplacements des méandres sur l'Ucayali, la quantification de ses déplacements devra être confirmée par l'utilisation d'un autre type d'imagerie satellites. Parmi celle-ci, les images LANDSAT semble le candidat idéale avec une résolution d'image de 30 mètres. Cette nouvelle étude confirmera ou infirmera l'utilisation des images MODIS, et permettra ou non d'appliquer cette méthode à d'autres rivières à méandres, très nombreuses dans le bassin Amazonien.

Bibliographie :

Brice J.C. *Evolution of Meander Loops*, Geological Society of America Bulletin, vol. 85. p 581-586, 1974.

Constantine, *Examining the physical meaning of the bank erosion coefficient used in meander*, 2008.

Daupras F., *Quantification des déplacements des rios en Amazonie Péruvienne par une approche utilisant la télédétection. Etude d'impact de la migration du Rio Ucayali sur la ville de Pucallpa*. Université Joseph Fourrier Grenoble, 60p, 2006.

Espinoza J.C., Fraizy P, Guyot JL, Ordoñez JJ, Pombosa R, Ronchail J. *La variabilité des débits du Rio Amazonas au Pérou*. Submitted to IAHS 5th World FRIEND Conference Red Book. La Havana, Cuba, 2006.

Hickin E.J. et Nanson G.C., *The Character of channel migration on the Beatton river, Northeast British Columbia, Canada*, 1975.

Hooke, *Spatial variability, mechanisms and propagation of change in an active meandering river*, 2006.

Hooke, *Complexity, self-organisation and variation in behaviour in meandering rivers*, 2007.

Lagasse P, *A Methodology and ArcView Tools for Predicting Channel Migration*.

Leopold L.B., Wolman M.G. *River Meanders*. Bulletin of the geological society of America, vol. 71. p 769-794, 1960.

Molinier M, Guyot J-L, *Les régimes hydrologiques de l'Amazone et de ses affluents. L'hydrologie tropicale : géoscience et outil pour le développement*, IAHS Publ. no. 238, 1996.

Nanson G.C., Hickin E.J. *A statistical analysis of bank erosion and channel migration in western Canada*, Geological Society of America Bulletin, vol. 97, p 497-504, 1986.

O'Connor, J. E., Jones, M. A., and T. L. Haluska. 2003. *Flood plain and channel dynamics of the Quinault and Queets* Rivers, Washington, USA. Geomorphology.

Rapp C.F., Abbe T.B. *A framework for delineating channel migration zones*. Ecology Final Draft Publication, 136p, 2003.

Seminara G., *Meanders*, J. Fluid Mech. , vol. 554, 2006.

Site web pour caractéristiques MODIS : http://modis.gsfc.nasa.gov/about/
https://lpdaac.usgs.gov/lpdaac/products/modis_overview

Manuel d'utilisation du logiciel eCognition.